



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-21-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.395

МЕТОД ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А.И. МИТЮХИН¹, И.И. ПИКИРЕНЯ²

¹Институт информационных технологий Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусская медицинская академия последипломного образования (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 11 декабря 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассматривается метод обработки цифрового изображения, обеспечивающий эффективную передачу, перераспределение и хранение видеографической информации аэрокосмического экологического мониторинга. Требование повышения эффективности мониторинга при необходимости выполнения регулярного контроля изменений в поле изображений наблюдаемого объекта особенно актуально при описании пространственно совмещенных наборов изображений, полученных после многозональной, многовременной и многополяризационной съемки. Во многих приложениях дистанционного зондирования эффективность обработки отражает степень снижения объемов передаваемой, описываемой, анализируемой и хранимой видеографической информации. Представляется вычислительный процесс обработки цифровых снимков на основе координатной схемы съемки. Метод может применяться для выполнения процедуры дешифрации снимков с целью решения задачи классификации объектов интереса, анализа изображений. В качестве дешифровочных признаков использовались такие характеристики бинарных объектов, как пространственная граница и контур. Эти признаки позволяют описать форму объекта, его геометрические параметры, осуществить поиск изображений с определенными пространственными структурами. Метод обработки реализуется путем выполнения эффективных алгоритмов кодирования изображения на дискретной сетке посредством цепного кода и спектрального кодирования на основе быстрого дискретного преобразования Хартли. Результат обработки сводится к минимизации количества таких базовых вычислительных операций, как умножение, сложение, пересылка, а также к уменьшению временной и емкостной сложности программы, снижению избыточности исходных данных. Приводится пример эффективного представления и описания сегментированного изображения объекта. Предложенный метод позволяет расширить технические возможности более эффективной передачи и обработки изображений для решения задач в области дистанционного зондирования.

Ключевые слова: экология, алгоритм, эффективность, изображение, спектр, энтропия, преобразование, избыточность, длина кода.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Митюхин А.И., Пикирениа И.И. Метод обработки изображения, полученного на основе аэрокосмического мониторинга. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 21-27.

IMAGE PROCESSING METHOD BASED ON AEROSPACE MONITORING

ANATOL I. MITSUKHIN¹, IVAN I. PIKIRENYA²

¹*Institute of Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 11 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The paper considers a digital image processing method that provides efficient transmission, redistribution and storage of aerospace environmental monitoring videographic information. The requirement to increase the monitoring efficiency, if necessary, to carry out regular monitoring of changes in the image field of the observed object is especially relevant when describing spatially aligned sets of images obtained after multi-zone, multi-time and multi-polarization shooting. In many remote sensing applications, the processing efficiency reflects the degree of reduction in the volume of transmitted, described, analyzed and stored videographic information. The computational processing of digital images based on the coordinate survey scheme is presented. The method can be used to perform the procedure for decoding images in order to solve the problem of classifying objects of interest, analyzing images. Such characteristics of binary objects as a spatial boundary and a contour were used as deciphering signs. These features make it possible to describe the shape of an object, its geometric parameters and search for images with specific spatial structures. The processing method is realized by executing efficient algorithms for coding an image on a discrete grid by means of a chain code and spectral coding based on the fast discrete Hartley transform. The result of processing comes down to minimizing the number of such basic computational operations as multiplication, addition, transferring, as well as reducing the time and capacitive complexity of the program, and reducing the redundancy of the initial data. An example of an effective representation and description of a segmented image of an object is given. The proposed method makes it possible to expand the technical capabilities of more efficient transmission and processing of images for solving problems in the field of remote sensing.

Keywords: ecology, algorithm, efficiency, image, spectrum, entropy, conversion, redundancy, code length.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mitsukhin A.I., Pikirenya I.I. Image processing method based on aerospace monitoring. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 21-27.

Введение

Современное решение задач экологического контроля окружающего пространства, изучение качественного состояния почвенных земельных ресурсов и их количественный учет, химический анализ водной среды рек, озер, болот и пр. основывается на широком использовании аэрокосмического наблюдения как в видимом диапазоне спектра, так и в мультиспектральных диапазонах электромагнитного излучения. Всесезонный аэрокосмический мониторинг лесных массивов, областей с залежами торфяников, крупных экологически опасных промышленных объектов с целью как можно более раннего обнаружения очагов возгорания требует постоянного обновления данных наблюдения. При получении фотоснимков, регистрации изображений после мультиспектрального сканирования актуальными задачами являются: обеспечение эффективной передачи, перераспределения и хранения видеографической информации, хранящейся в базе данных изображений; быстрая обработка и обслуживание (поиск) цифровых данных, отображающих изображения интереса. Повышение эффективности аэрокосмических методов контроля напрямую связано с исследованием, разработкой и использованием новых более эффективных алгоритмов цифровой обработки изображений (ЦОИ), уменьшающих объем данных, подлежащих передаче по имеющимся каналам с заданной пропускной способностью. В статье

предлагается к рассмотрению вычислительный алгоритм, позволяющий решать задачи ЦОИ, связанные с анализом характерных признаков наблюдаемого 2D-объекта, его эффективным представлением и описанием. Рассматриваемый алгоритм обработки предназначен для решения реальных задач обработки данных, полученных после этапа сегментации.

Теоретические принципы

Рассматривается подход к обработке сегментированных изображений, включающий в себя два последовательных вычислительных процесса (этапа). На первом этапе цифровой обработки 2D-данных осуществляется их эффективное кодирование в пространственной области. На втором этапе осуществляется эффективное кодирование (преобразование) кодовых последовательностей в спектральной области. Результатом интегрированного процесса 2-кратного кодирования являются данные, снижающее избыточность исходного изображения. Следствием этого является упрощение анализа изображения и выявление его основных отличительных признаков.

В качестве данных из изображений рассматривались 2D-бинарные (яркость пикселя равна единице) однородные в визуальном плане объекты: границы $g(x, y)$ некоторой области изображения $f(x, y) \in Z^2$, где (x, y) – значения координат декартова произведения Z^2 . Все пиксели изображения $g(x, y)$ находятся на краю области объекта наблюдения. В этом случае граница g представляется последовательностью целых чисел $g = ((x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1}))$, где n обозначает длину границы. Пиксели (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) являются смежными. Описание последовательности g требует использовать $L = 2n$ целых десятичных чисел. Для передачи (хранения) последовательности g в двоичном виде длина последовательности возрастает до величины $L' = Lk$, где k – размерность кода, определяет число информационных символов. Реальные значения k находятся в диапазоне $8 \div 10$. Требование высокой достоверности передачи данных по радиоканалам систем аэрокосмического наблюдения приводит к необходимости применения помехоустойчивого кодирования $[N, k, d]$ -кодом со скоростью

$R = \frac{k}{N}$, где N – значность кода, $d \geq 2t + 1$ – минимальное расстояние кода, t – корректирующая способность кода [1]. Известные высокоскоростные помехоустойчивые коды со сравнительно малой корректирующей способностью $t = 1 \div 4$ приводят к увеличению длины кодовой последовательности до значения

$$L'' = 2nRN. \quad (1)$$

Величину L'' (1) существенно можно уменьшить, применяя кодирование последовательности g цепным кодом [2]. Наибольшая эффективность представления данных этим кодом достигается для изображений, когда взаимосвязь между соседними пикселями отвечает смежности и нет соседей пикселей, принадлежащих области $f(x, y) \in Z^2$. Это условие выполняется, когда обеспечивается высокая точность выполненной сегментации [3]. Если использовать алгоритм кодирования 8-связным кодом, исходная g 2D-последовательность преобразуется в одномерное кодовое слово g^c длиной $L''' = n$. Каждому десятичному символу одномерной последовательности g^c соответствует двоичное информационное значение $k = 3$. Таким образом, уже на первом этапе кодирования уменьшается размер входа обработки почти в три раза. В сравнении с матричным представлением 2D-объекта на множестве Z^2 формируется 1D-вектор, который является полным представлением границы области интереса или ее формы.

На основе информационного подхода последовательность g^c определим как формируемую на выходе дискретного источника без памяти [4] $G^c = (g_0^c, g_1^c, \dots, g_{n-1}^c)$, $g_i^c \in \{0, 1, \dots, 7\}$. Каждый i -й одиночный символ источника G^c появляется

на выходе с вероятностью p_i . Статистические характеристики источника G^c задаются множеством $P = \{p_0, p_1, \dots, p_7\}$. Имея конкретное изображение, формируемое источником, можно оценить его информационное содержание посредством вычисления энтропии H . Сравнивая вычисленное значение энтропии с максимально возможным H_0 (когда источник описывается полной неопределенностью), можно показать, что реальные последовательности g^c обладают кодовой избыточностью $r = 1 - H/H_0$. Для устранения кодовой избыточности применяют методы энтропийного и универсального кодирования [5]. Однако эффективность этих методов относительно невысокая.

Другой способ представления случайного процесса источника состоит в вычислении корреляционной или ковариационной функции последовательности g^c . Высокая степень корреляции между символами позволяет реализовать второй этап эффективного кодирования посредством спектрального преобразования. В качестве преобразования рассматривается действительное дискретное преобразование Хартли (ДПХ). В сравнении с комплексным ДПФ, где требуется использовать $2B$ действительных значений, преобразование Хартли выполняется над B действительными значениями [6]. Кроме того, в сравнении с дискретным косинусным преобразованием и ДПФ, прямое и обратное ДПХ совпадают, что также уменьшает сложность ЦОИ. Длина преобразования определяется значением N_c .

Для сокращения длины преобразования выполним лексикографическое преобразование по столбцам вектора g^c в матрицу G^c . Пусть индексы строк и столбцов матрицы G^c обозначаются традиционно как m и n , а новую длину преобразования обозначим N_c^l . Прямое дискретное 2D-преобразование Хартли в матричной форме имеет вид [7]

$$\hat{G}^c = \mathbf{H} \mathbf{G}^c \mathbf{H}, \quad (2)$$

где \hat{G}^c – матрица коэффициентов преобразования, G^c – матрица кодовой последовательности g^c , \mathbf{H} – матрица дискретных функций Хартли

$$\cos\left(\frac{2\pi m v}{N_c^l}\right), \quad (3)$$

где v – частотный индекс функции m – пространственный индекс функции, m и v изменяются в пределах от 0 до $N_c^l - 1$. Обратное 2D-ДПХ определяется как

$$\tilde{G}^c = \frac{1}{N_c^{l2}} \mathbf{H} \hat{G}^c \mathbf{H}. \quad (4)$$

После перехода в спектральную область (2) выполняется отбор (фильтрация) коэффициентов преобразования. В работе рассматривался алгоритм адаптивной фильтрации с использованием порогового критерия. Эффективность обработки оценивалась отношением $K = \frac{D}{M}$, где D – затраты на передачу изображения объекта без кодирования, M – затраты на передачу изображения с использованием кодирования. Ниже приводится пример применения рассматриваемого метода 2-этапного кодирования.

Пример. На рис. 1 показан аэрофотоснимок морского залива (кадр видео <https://vimeo.com/103608554>). Требуется эффективно представить и описать границу залива с нулевым значением среднеквадратической ошибки $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N_c^{l2}} \sum_m \sum_n ((\tilde{g}_c(m, n) - g_c(m, n))^2)}$,

где $\tilde{g}_c(m, n)$ – значения матрицы \tilde{G}^c восстановленного изображения.

После процессов цифрового представления изображения сегментации и бинаризации граница состоит из 64 пикселей. Для их описания требуется подмножество из 128 десятичных чисел, принадлежащих множеству Z^2 . Кодирование цепным кодом порождает кодовое слово, которое описывается матрицей (5).



Рис. 1. Аэрофотоснимок залива
Fig. 1. Aerial view of the bay

$$\mathbf{G}^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 \\ 7 & 7 & 6 & 7 & 6 & 6 & 6 & 4 \\ 4 & 4 & 5 & 4 & 4 & 6 & 6 & 5 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 3 & 4 & 4 & 6 & 6 & 4 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Используя выражение (2), вычисляются спектральные коэффициенты Хартли. Ядро ДПХ образуется дискретными функциями (3). Структура матрицы \mathbf{H} имеет вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1,4142 & 1 & 0 & -1 & -1,4142 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1,4142 & -1 & 0 & 1 & -1,4142 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1,4142 & 1 & 0 & -1 & 1,4142 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1,4142 & -1 & 0 & 1 & 1,4142 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Результат адаптивной фильтрации коэффициентов Хартли отражается матрицей

$$\tilde{\mathbf{G}}^c = \begin{pmatrix} 194 & -13,38 & 0 & 0 & 0 & 23,39 & -14 & -13,48 \\ 55,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13,73 & -22,24 & 0 \\ 40 & -12,56 & 0 & 0 & 0 & 18,56 & -12 & -20,66 \\ -12,99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,59 & -14,24 & 0 \\ -14 & -11,73 & 0 & -17,49 & 0 & 13,73 & 22 & 0 \\ 27,01 & -11,73 & 0 & -12,66 & 0 & 24,07 & -13,73 & 0 \\ 28 & 0 & 0 & -16,66 & 0 & 16,9 & 0 & 0 \\ -95,01 & 12,41 & 0 & 0 & 0 & 15,24 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Подставляя в (4) значения матрицы (7), получаем восстановленные значения коэффициентов в спектральной области. При этом величина среднеквадратической ошибки

близка к нулевому значению, $\varepsilon = 0,125$. Затраты на передачу изображения с использованием кодирования составили величину $M = 32$. Эффективность обработки оценивается значением $K = \frac{128}{32} = 4$.

С учетом выигрыша в обработке на первом этапе кодирования, размер входа обработки уменьшился почти в $\approx (3 + 4) \approx 7$ раз. При исходном значении $k = 8$ бит на пиксел метод 2-этапного кодирования позволяет иметь затраты величиной 1,14 бит на пиксел.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования, связанные с оценкой эффективности рассмотренного метода обработки сегментированных изображений, проводились с использованием операционной среды MATLAB. Моделировался замкнутый путь по границе (бинарному контуру) в виде упорядоченной (неповторяющейся) последовательности пикселей, начиная с любого назначенного отправного пикселя и в виде последовательности (неупорядоченной), значения которой могут встречаться несколько раз по пути границы. Неупорядоченная последовательность пикселей описывала более сложный объект со связанными контурами. При условии соблюдения текущего направления отрезков связанных контуров (с возвратом к отправному пикселу) оценивалась эффективность описания и для такого изображения границы. Основные исследования проведены для границ с плавной характеристикой формы и границ, имеющих как плавные, так и резкие очертания. Представление границы формировалось на 4-связных и 8-связных отрезках. Соответственно строились 4-связные и 8-связные цепные коды, с помощью которых осуществлялось пространственное описание границы. Спектральное описание выполнялось с помощью типовых средств программирования MATLAB.

Заключение

Успешное и эффективное применение систем аэрокосмического зондирования земной поверхности для решения разнообразных задач в этой предметной области требует внедрения современных более производительных методов ЦОИ. В этом направлении был описан подход, позволяющий с меньшими временными и вычислительными затратами решать задачи, связанные с анализом пространственных структур объектов, их реконструкции на основе анализа их сегментированных изображений границ, контуров и линий. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- рассматриваемый метод не требует использования сложных структур для записи исходных данных, описываемых цепным кодом. Привычная форма представления изображения в виде матрицы цепного кода позволяет легко и эффективно выполнять обработку на евклидовой сетке с использованием многих современных языков программирования;

- не имеет значения, состоит ли изображение лишь из несколько строк или представляет сложную сцену – объем требуемой памяти остается постоянным и зависит только от размера изображения;

- с минимальными вычислительными затратами можно получать количественные оценки геометрических параметров, таких как длина границы (контура), площадь, периметр формы;

- как и для любых неоднородных изображений, степень эффективности обработки зависит от статистических характеристик источника. Исследования показали, что наличие резких локальных изменений очертания границы (контура) снижает эффективность обработки для условия, при котором значение ошибки восстановления изображения стремится к нулю.

Подход может использоваться и в медицине, в частности – для анализа изображений раневых поверхностей с целью оценки эффективности лечения, поиска характерных контуров в области анализа медицинских изображений.

Список литературы

1. Ipatov V. *Spread Spektrum and CDMA. Principles and Application*. John Wiley & Sons, Ltd; 2005.
2. Burger W., Burg M.J. *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin-Heidelberg: Springer; 2005, 2006.
3. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*. Москва: Техносфера; 2007.
4. Чисар И., Кернер Я. *Теория информации*. Москва: Мир; 1985.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
6. Mitsiukhin A. Segmentation of Dynamical Images by Means of Discrete Hartley Transform. *Proceedings 56. International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2011; id 1100: 1-4.
7. Mitsiukhin A., Karcheuski A. Filtration of Videographic Data by Means of Hartley Discrete Transform. *Proceedings 53 International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2008: 365-366.

References

1. Ipatov V. *Spread Spektrum and CDMA. Principles and Application*. John Wiley & Sons, Ltd; 2005.
2. Burger W., Burg M.J. *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin-Heidelberg: Springer; 2005, 2006.
3. Jähne B. [*Digital Image Processing*]. Moscow: Technosphere; 2007. (in Russ.)
4. Chisar I, Kerner J. [*Information Theory*]. Moscow: World; 1985. (in Russ.)
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
6. Mitsiukhin A. Segmentation of Dynamical Images by Means of Discrete Hartley Transform. *Proceedings 56. International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2011; id 1100: 1-4.
7. Mitsiukhin A., Karcheuski A. Filtration of Videographic Data by Means of Hartley Discrete Transform. *Proceedings 53 International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2008: 365-366.

Вклад авторов / Authors' contribution

Вклад каждого из авторов в работу оценивается в равной мере.

The contribution of each of the authors to the work is assessed equally.

Сведения об авторах

Митюхин А.И., доцент, доцент кафедры физико-математических дисциплин Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пикиреня И.И., к.м.н., доцент, заведующий кафедрой трансплантологии Белорусской медицинской академии последипломного образования.

Information about the authors

Mitsiukhin A.I, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Mathematics Department of the Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pikirenya I.I, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Transplantology of the Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education.

Адрес для корреспонденции

220037, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Козлова, 28,
Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-111-20-57;
e-mail: mityuhin@bsuir.by
Митюхин Анатолий Иванович

Address for correspondence

220037, Republic of Belarus,
Minsk, Kozlova str., 28,
Institute of Information Technologies
of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
тел. +375-29-111-20-57;
e-mail: mityuhin@bsuir.by
Mitsiukhin Anatol Ivanovich